

HNN技法による水火力系統の最適運用計画計算法

都 築 旋 二

Optimum Operation Scheduling Algorithm for Hydro-Thermal System Using of HNN Technique

SENJI TSUZUKI

*School of Science and Technology. Meiji University 1-1-1,
Higashimita, Tama-ku, 214*

Received January 8, 1993; Accepted March 30, 1993

Synopsis : This paper describes the daily optimum operation scheduling algorithm for hydro-thermal systems using of Hopfield type neural net (HNN). The model system includes the hydro-stations with connected in series on a rivier. At first, the technique of HNN is described to gives a new interpretation. Secondly, optimizing equations are introduced and the relations between optimizing equations and performance equations of neurons are explained. Furthermore, neuron's bias is introduced for the operational constraints on the system. Finally, the simulation on a model system shows that the solution fully satisfies the optimizing equations.

1. はじめに

ホップ・フィールド型ニューラルネット（以下、HNNと略記する）は近年最適化手法の一つとして注目され、種々の分野での適用が検討されている。電力系統運用の分野においても火力系統の負荷配分計画、起動停止計画、あるいは、水火力系統の負荷配分計画などに対する適用が試みられている。^{(1)~(3)}

従来、貯水量変化にともなう落差変動を無視し得る場合の水火力系統最適運用計画はガン

マ法と呼ばれる『増分水単価』を導入した方法によって計算されている。本文では、まず、最適化方程式を導き、これを満足する解を得るためにHNN技法を適用することを述べ、制約条件に掛る場合の取扱法としてHNNのバイアスを用いる手法を提案している。次に、接続した2水力と等価1火力から構成されるモデル水火力系統にHNNの技法を適用し、十分に最適化方程式を満足する解を得ることが出来ることを示している。

2. HNN技法

HNNは相互結合型のニューラルネットであり、(1)式で表されるネットワークのエネルギーを最小ならしめるように動作する性質を持っている。この性質を利用して最適化問題を解くことが出来る。

$$E = -\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m X_i A_{ij} X_j / 2 - \sum_{i=1}^m B_i X_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

- E : ネットワークのエネルギー
- X_i : ニューロンi 出力
- A_{ij} : ニューロンij相互間の結合係数
- B_i : ニューロンi のバイアス
- m : ニューロン個数

各ニューロンは、その入力を Y_i とすると、次式に従った動作を行う。

$$dY_i / dt = \sum_{j=1}^m A_{ij} X_j + B_i \quad \dots\dots\dots (2)$$

ニューロン入力 Y_i と出力 X_i は次のシグモイド関数で結ばれている。

$$X_i = 1 / \{ 1 + \exp(-Y_i) \} \quad \dots\dots\dots (3)$$

A_{ij} および B_i を与えて、(2)式の連立微分方程式を解が収束するまで計算すれば最適解を得ることが出来る。この方法を一般の最適化問題に適用するに当たっては目的関数を(1)式のような2次形式で表現しなければならない点に適用上の困難さがある。

(2)式はネットワークエネルギーの最大傾斜の方向に独立変数 X を修正することを意味している。また(3)式のシグモイド関数は独立変数の許容領域を0～1に制約していると見ることが出来る。このようにHNN技法を解釈するならば、この方法は過去におけるアナログ・コンピュータによる最大傾斜法^[7]と同様な方法と見ることが出来る。

筆者は文献[4]～[6]において、(1)式の代わりにラグランジュ関数を採用し、またシグモイド関数を独立変数の制約に使用することを提案し、これによって非線形最適化問題にもHNN技法が適用可能となることを示した。以下の章において接続水系運用最適化問題にこの手法を適用したところを示す。

3. モデル連接水系とその運用計画問題の定式化

考察の対象とする連接水系を図-1に示す。

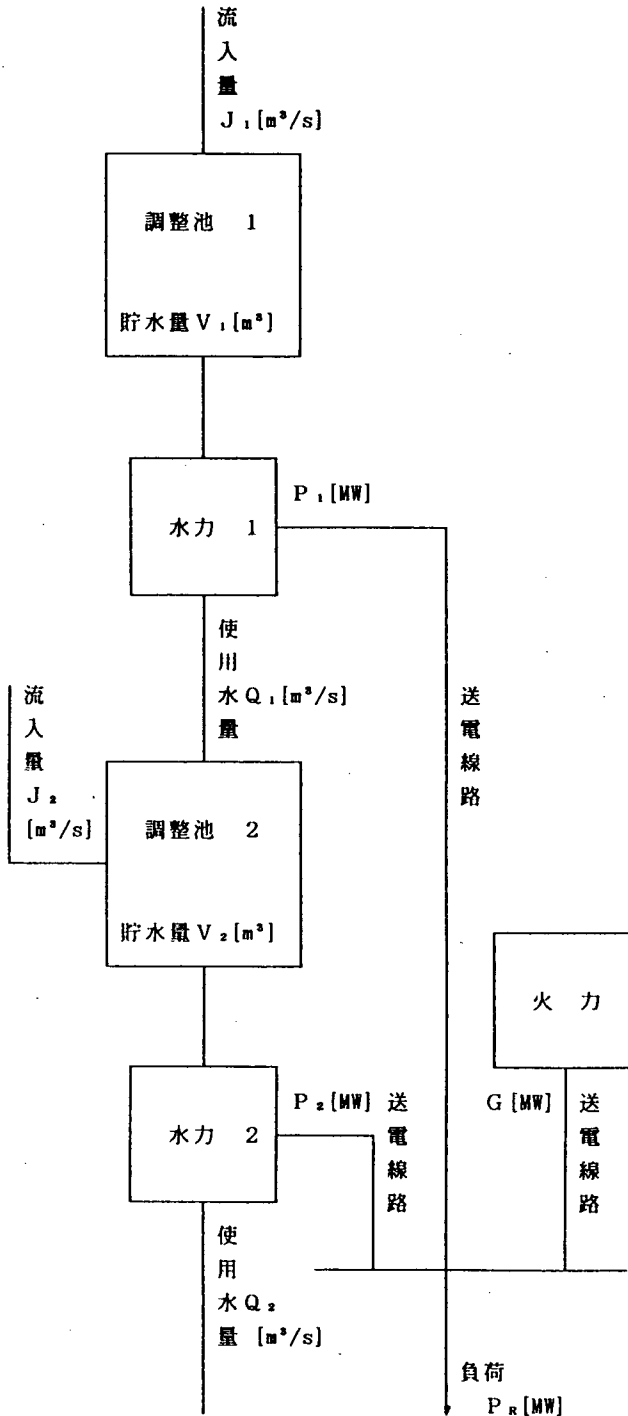


図-1 モデル連接水系の構成

水力 1 は最上流に位置し、調整池を持っているが、その貯水量による落差変動は無視し得る程度と仮定する。水力 2 は、水力 1 の直下に位置し、小容量の調整池を持つがその落差変動も無視し得る程度と仮定する。水力 1 と水力 2 の間の水の流下時間は無いものとする。なお、調整池 2 へも支流からの流入があるものとする。このような単純なモデル水系と火力系統が無損失線路によって結ばれ、水火力系統を構成している。図-1 に示した記号を用いて問題を定式化すると、次のように書ける。

水力使用量特性

$$Q_{ni} = a_n P_{ni}^2 / 2 + b_n P_{ni} + C_n \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$n = 1, 2$$

使用水量平衡条件

$$\sum_{i=1}^I Q_{1i} = \sum_{i=1}^I J_{1i} \quad \text{調整池 1} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sum_{i=1}^I Q_{2i} = \sum_{i=1}^I Q_{1i} + \sum_{i=1}^I J_{1i} \quad \text{調整池 2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

電力需給平衡条件

$$P_{1i} + P_{2i} + G_i = L_i \quad \dots\dots\dots (7)$$

火力燃料費特性

$$F_i = f(G_i) \quad \dots\dots\dots (8)$$

発電機ユニット出力制約

$$P_{min} \leq P_{ni} \leq P_{max} \quad n = 1, 2 \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$G_{min} \leq G_i \leq G_{max} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここで、

i : 時間帯番号 ($i = 1 \sim I$)

P_{ni} : No. n 水力出力 (MW)

a_n, b_n, C_n : 定数

G_i : 火力出力 (MW)

F_i : 火力燃料費 (10^3 円/Hr)

$f(G_i)$: G_i の単調増加関数

J_{ni} : No. n 調整池流入流量 (m^3/sec)

Q_{ni} : No. n 水力使用水量 (m^3/sec)

L_i : 負荷 (MW)

P_{min}, P_{max} : No. n 水力出力下限値、上限値 (MW)

G_{min}, G_{max} : 火力出力下限値、上限値 (MW)

問題は、考察期間中における調整池流入流量および負荷が与えられたとき、指定水量を使

用し尽す条件のもとで、期間内における火力全燃料費が最小となるような各時間帯の水力および火力の出力を決定することである。

4. 最適化方程式の誘導

次のラグランジュ関数を定義する。

$$\begin{aligned}
 \Phi (P_{1i}, P_{2i}, G_i, \lambda_i, \gamma_1, \gamma_2) \\
 = & \sum_{i=1}^I F_i \\
 & + \sum_{i=1}^I \lambda_i (L_i - P_{1i} - P_{2i} - G_i) \\
 & + \gamma_1 \left(\sum_{i=1}^I Q_{1i} - \sum_{i=1}^I J_{1i} \right) \\
 & + \gamma_2 \left(\sum_{i=1}^I Q_{2i} - \sum_{i=1}^I Q_{1i} - \sum_{i=1}^I J_{2i} \right) \\
 & + \sum_{i=1}^I \mu_{Gi} (G_i - G_{\max}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \nu_{Gi} (G_{\min} - G_i) \\
 & + \sum_{i=1}^I \mu_{p1i} (P_{1i} - P_{1\max}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \nu_{p1i} (P_{\min} - P_{1i}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \mu_{p2i} (P_{2i} - P_{2\max}) \\
 & + \sum_{i=1}^I \nu_{p2i} (P_{2\min} - P_{2i}) \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

ここで、

λ_i : 時間帯 i における需給平衡条件に関する双対変数

γ_n : No.n水力の使用水量平衡条件に関する双対変数

μ_{Gi} : 火力出力上限制約に関する双対変数

ν_{Gi} : 火力出力下限制約に関する双対変数

μ_{pni} : No.n水力出力上限制約に関する双対変数

ν_{pni} : No.n水力出力下限制約に関する双対変数

(11)を最小ならしめるには、次の諸式が成立せねばならない。

$\partial \Phi / \partial G_i = 0$ より、

$$\partial F_i / \partial G_i - \lambda_i + \mu_{Gi} - \nu_{Gi} = 0 \quad i = 1 \sim I \dots\dots\dots (12)$$

$\partial \Phi / \partial P_{1i} = 0$ より、

$$-\lambda_i + (\gamma_1 - \gamma_2) (\partial Q_{1i} / \partial P_{1i}) + \mu_{p1i} - \nu_{p1i} = 0 \quad i = 1 \sim I \dots\dots\dots (13)$$

$\partial \Phi / \partial P_{2i} = 0$ より、

$$-\lambda_i + \gamma_2 (\partial Q_{2i} / \partial P_{2i}) + \mu_{p2i} - \nu_{p2i} = 0 \quad i = 1 \sim I \quad (14)$$

$\partial \Phi / \partial \lambda_i = 0$ より、

$$L_i - P_{1i} - P_{2i} - G_i = 0 \quad i = 1 \sim I \quad (15)$$

$\partial \Phi / \partial \gamma_1 = 0$ より、

$$\sum_{i=1}^I Q_{1i} = \sum_{i=1}^I J_{1i} \quad (16)$$

$\partial \Phi / \partial \gamma_2 = 0$ より、

$$\sum_{i=1}^I Q_{2i} - \sum_{i=1}^I Q_{1i} = \sum_{i=1}^I J_{2i} \quad (17)$$

(12)~(17)式が最適化方程式であり、これらの連立方程式を解くことによって得られる解は(9)~(10)の不等式制約をも満たしていなければならない。

5. HNN技法による計算式

最適化方程式から、ニューロン動作を表す微分方程式を作る。すなわち、

火力ニューロン (I 個)

$$dXG_i / dt = K_u \{ \lambda_i - dF_i / dG_i - \mu_{Gi} + \nu_{Gi} \} \quad (18)$$

$$G_i = G_{min} + (G_{max} - G_{min}) / \{ 1 + \exp(-XG_i) \} \quad (19)$$

上式において、

$G_{min} < G_i < G_{max}$ の場合

$$\mu_{Gi} = \nu_{Gi} = 0 \quad (20)$$

$G_i \leq G_{max}$ の場合

$$\mu_{Gi} = \lambda_i - [dF_i / dG_i]_{G=G_{max}} \quad \nu_{Gi} = 0 \quad (21)$$

$G_i \leq G_{min}$ の場合

$$\begin{aligned} \mu_{Gi} &= 0 \\ \nu_{Gi} &= [dF_i / dG_i]_{G=G_{min}} - \lambda_i \end{aligned} \quad (22)$$

水力ニューロン (I 個)

$$dXP_{1i} / dt = K_u \{ \lambda_i - (\gamma_1 - \gamma_2) \times (a_1 P_{1i} + b_1) - \mu_{p1i} + \nu_{p1i} \} \quad (23)$$

$$P_{1i} = P_{1min} + (P_{1max} - P_{1min}) / \{ 1 + \exp(-xp_{1i}) \} \quad (24)$$

上式において、

$P_{1min} < P_{1i} < P_{1max}$ の場合

$$\mu_{p1i} = \nu_{p1i} = 0 \quad (25)$$

$P_{1i} \leq P_{1max}$ の場合

$$\mu_{p1i} = \lambda_i - (\gamma_1 - \gamma_2) \times (a_1 P_{1max} + b_1) \quad \nu_{p1i} = 0 \quad (26)$$

$P_{1i} \leq P_{1min}$ の場合

$$\begin{aligned} \mu_{p1i} &= 0 \\ \nu_{p1i} &= (\gamma_1 - \gamma_2) (a_1 P_{1min} + b_1) - \lambda_i \quad (27) \end{aligned}$$

水力2ニューロン (I 個)

$$dXP_{2i}/dt = K_u \{ \lambda_i - \gamma_2 (a_2 P_{2i} + b_2) - \mu_{p2i} + \nu_{p2i} \} \quad (28)$$

$$P_{2i} = P_{2min} + (P_{2max} - P_{2min}) / \{ 1 + \exp(-XP_{2i}) \} \quad (29)$$

上式において、

$P_{2min} < P_{2i} < P_{2max}$ の場合

$$\mu_{p2i} = \nu_{p2i} = 0 \quad (30)$$

$P_{2i} \geq P_{2max}$ の場合

$$\mu_{p2i} = \lambda_i - \gamma_2 (a_2 P_{2max} + b_2) \quad \nu_{p2i} = 0 \quad (31)$$

$P_{2i} \leq P_{2min}$ の場合

$$\begin{aligned} \mu_{p2i} &= 0 \\ \nu_{p2i} &= \gamma_2 (a_2 P_{2min} + b_2) - \lambda_i \quad (32) \end{aligned}$$

ラムダニューロン (I 個)

$$dX\lambda_i/dt = K_{lam} \{ L_i - P_{1i} - P_{2i} - G_i \} \quad (33)$$

$$\lambda_i = \lambda_{min} + (\lambda_{max} - \lambda_{min}) / \{ 1 + \exp(-X\lambda_i) \} \quad (34)$$

ガンマ1ニューロン (1 個)

$$dX\gamma_1/dt = K_{gam} \{ \sum_{i=1}^I Q_{1i} - \sum_{i=1}^I J_{1i} \} \quad (35)$$

$$\gamma_1 = \gamma_{1min} + (\gamma_{1max} - \gamma_{1min}) / \{ 1 + \exp(-X\gamma_1) \} \quad (36)$$

ガンマ2ニューロン (1 個)

$$dX\gamma_2/dt = K_{gam} \{ \sum_{i=1}^I Q_{2i} - \sum_{i=1}^I Q_{1i} - \sum_{i=1}^I J_{1i} \} \quad (37)$$

$$\gamma_2 = \gamma_{2min} + (\gamma_{2max} - \gamma_{2min}) / \{ 1 + \exp(-X\gamma_2) \} \quad (38)$$

ここで、 XG_i , Xp_{1i} , Xp_{2i} , $X\lambda_i$, $X\gamma_1$, $X\gamma_2$ はそれぞれニューロン入力を、 G_i , P_{2i} , λ_i , γ_1 , γ_2 はそれぞれニューロン出力をそれぞれ表している。 μ_{Gi} , μ_{p1i} , μ_{p2i} , ν_{Gi} , ν_{p1i} , および ν_{p2i} はニューロンのバイアスに相当するものであり、該当する制約に違反しない場合には零となっている。しかし、制約値に達するとニューロン入力を零とするような値

を取り、ニューロン出力を維持する働きをしている。また、 K_u , K_{ram} , K_{gam} はニューロン速度に相当する正の係数であり、その値が大きい程1ステップ当りの修正量が大きくなる。

G_i , P_{1i} , P_{2i} , λ_i ($i=1\sim I$), γ_1 , γ_2 それぞれに初期値を与えて、任意の方法により上記の連立微分方程式を収束するまで解けば、最適解が得られる。従来のHNN技法では評価関数を最小ならしめるように各変数をその最大傾斜の方向に移動しているに過ぎないが、本手法はニューロン速度を適切に選定することによって効率よく最適点に到達せしめることが出来る特徴を持っている。

6. ニューロンの動作の検討

各ニューロンの動作状況を調べてみると次のようになっていることが分かる。すなわち

火力ニューロン

出力制約に違反しない状態で収束した場合には、 μ_{G_i} および ν_{G_i} は両者とも零であり、

$$dXG_i/dt = K_u \cdot \{\lambda_i - \partial F_i / \partial G_i\} = 0 \dots\dots\dots (39)$$

が成り立っているから、最適化方程式が満たされている。未収束の段階では、 G_i 過大のとき $dXG_i/dt < 0$ となるので G_i は減少する方向に修正される。また、 G_i 過小のとき、 $dXG_i/dt > 0$ となるので G_i は増大する方向に修正される。

出力制約にかかる場合には、ニューロンバイアスに相当する量 μ_{G_i} あるいは ν_{G_i} を導入することによってニューロン入力、すなわち、 dXG_i/dt を零ならしめている。

水力1ニューロン

出力制約に違反しない状態で収束した場合には、 $\mu_{P_{1i}}$ および $\nu_{P_{1i}}$ が共に零であり、

$$dXP_{1i}/dt = K_u \cdot \{\lambda_i - (\gamma_1 - \gamma_2) \times (a_1 P_{1i} + b_1)\} = 0 \dots\dots\dots (40)$$

が成り立っているから、最適化方程式が満たされている。未収束の段階では、 P_{1i} 過大のとき、 $dXP_{1i}/dt < 0$ となるので P_{1i} は減少する方向に修正される。 P_{1i} 過小のとき、 $dXP_{1i}/dt > 0$ となるので P_{1i} は増大する方向に修正される。これらの修正がうまく行われるためには $\gamma_1 > \gamma_2$ の関係が常に成立せねばならない。

出力制約にかかる場合には、ニューロンバイアス $\mu_{P_{1i}}$ および $\nu_{P_{1i}}$ を導入することによって dXP_{1i}/dt を零ならしめている。

水力2ニューロン

出力制約に違反しない状態で収束した場合には、 $\mu_{P_{2i}}$ および $\nu_{P_{2i}}$ が共に零であり、

$$dXP_{2i}/dt = K_u \cdot \{\lambda_i - \gamma_2 (a_2 P_{2i} + b_2)\} = 0 \dots\dots\dots (41)$$

が成り立っているから、最適化方程式が満たされている。未収束の段階では、 P_{2i} 過大のとき、

$dXP_{2i}/dt < 0$ となるので P_{2i} は減少する方向に修正される。 P_{2i} 過小のとき、 $dXP_{2i}/dt > 0$ となるので P_{2i} は増大する方向に修正される。

出力制約にかかる場合には、ニューロンバイアス μ_{p2i} および ν_{p2i} を導入することによって dXP_{2i}/dt を零ならしめている。

ラムダニューロン

収束した状態では、

$$dX\lambda_i/dt = K_{\lambda am} \{L_i - P_{1i} - P_{2i} - G_i\} = 0 \dots\dots\dots (42)$$

が成り立っているから、最適化方程式が満たされている。未収束の段階では、総発電力 ($P_{1i} + P_{2i} + G_i$) が負荷 L_i に足りないとき、 $dX\lambda_i/dt > 0$ となるので、 λ_i が増大するように修正され、 G_i 、 P_{1i} 、 P_{2i} が上記の関係から増大することになる。総発電力が負荷を上回るときには、この逆で、 λ_i が減少し、 G_i 、 P_{1i} 、 P_{2i} が減少する方向に修正が行われる。

ガンマ1ニューロン

収束した状態では、

$$dX\gamma_1/dt = K_{\gamma am} \left\{ \sum_{i=1}^I Q_{1i} - \sum_{i=1}^I J_{1i} \right\} = 0 \dots\dots\dots (43)$$

が成り立っているから、最適化方程式が満たされている。未収束の段階では、使用水量総和 $\sum_{i=1}^I Q_{1i}$ が水量 $\sum_{i=1}^I J_{1i}$ より大きいとき、 $dX\gamma_1/dt > 0$ となるので、 γ_1 が増大するように修正される。 γ_1 の増大にともなって、 P_{1i} は上記の関係から減少し、したがって、使用水量 Q_{1i} が減少することになる。

ガンマ2ニューロン

収束した状態では、

$$dX\gamma_2/dt = K_{\gamma am} \left\{ \sum_{i=1}^I Q_{2i} - \sum_{i=1}^I Q_{1i} - \sum_{i=1}^I J_{2i} \right\} = 0 \dots\dots\dots (44)$$

が成り立っているから、最適化方程式が満たされている。未収束の段階では、使用水量総和 ($\sum_{i=1}^I Q_{2i}$) が使用可能な水量 ($\sum_{i=1}^I Q_{1i} + \sum_{i=1}^I J_{2i}$) より大きいとき、 $dX\gamma_2/dt > 0$ となるので γ_2 が増大するように修正される。 γ_2 の増大にともなって、 P_{2i} は上記の関係から減少し、したがって使用水量 Q_{2i} が減少することになる。

以上に述べたように、各ニューロンの動作方程式は必ず最適化方程式を満足する解に収束し、収束に至る途中では必ず最適点の方向に修正が進められる性質を持っていることが分かる。問題はニューロンの動作速度をどのように選定すれば、最も少ない計算回数で収束させることが出来るか、と言う点に絞られる。

7. 適用例

モデル系統は図-1に示したように構成され、表-1および表-3に示す特性を持つ12時間帯モデルとした。このモデルに上記の手法を適用したところを示す。

表-1 水火力ユニット特性

水力出力特性			
$Q_{1i} = 1.3757 + 0.9721P_{1i} + 0.00023087P_{1i}^2 / 2$ $Q_{2i} = 0.5861 + 1.1364p_{2i} + 0.00053331p_{2i}^2 / 2$ $64 \geq P_{1i} \geq 0$ $85 \geq P_{2i} \geq 0$ $P_{ni} : [\text{MW}] \quad Q_{ni} : [\text{m}^3/\text{s}] \quad n=1,2$			
火力燃料費特性			
$F_i = 5.0G_i - 0.00175G_i^2 + 0.00003167G_i^3$ $dF_i/dG_i = 5.0 - 0.0035G_i + 0.0000948G_i^2$ $250 \geq G_i \geq 0$ $G_i : [\text{MW}] \quad F_i : [10^3 \text{円}/\text{Hr}] \quad dF_i/dG_i : [10^3 \text{円}/\text{MWH}]$			

表-2 流入量および負荷

i	$J_1 [\text{m}^3/\text{s}]$	$J_2 [\text{m}^3/\text{s}]$	$L [\text{MW}]$
1	49.0	8.3	178
2	49.0	8.3	215
3	49.0	8.3	254
4	49.0	8.3	263
5	49.0	8.3	238
6	49.0	8.3	264
7	49.0	8.3	340
8	49.0	8.3	274
9	49.0	8.3	250
10	49.0	8.3	189
11	49.0	8.3	145
12	49.0	8.3	144
Σ	588.0	99.6	2,754

表-3 ニューロン動作方程式

火力ニューロン 12個	
$dXG_i/dt=K_u \{ \lambda_i - 5.0 + 0.0035G_i - 0.0000948G_i^2 \}$ $G_i = 250 / \{ 1 + \exp(-XG_i) \}$	
水力1ニューロン 12個	
$dXP_{1i}/dt=K_u \{ \lambda_i - (\gamma_1 - \gamma_2) \times (0.9721 + 0.0002308P_{1i}) \}$ $P_{1i} = 64 / \{ 1 + \exp(-XP_{1i}) \}$	
水力2ニューロン 12個	
$dXP_{2i}/dt=K_u \{ \lambda_i - \gamma_2 (1.1364 + 0.00053331P_{2i}) \}$ $P_{2i} = 85 / \{ 1 + \exp(-XP_{2i}) \}$	
ラムダニューロン 12個	
$dX\lambda_i/dt=K_{lam} \{ L_i - G_i - P_{1i} - P_{2i} \}$ $\lambda_i = \lambda_{min} + (\lambda_{max} - \lambda_{min}) / \{ 1 + \exp(-X\lambda_i) \}$	
ガンマ1ニューロン 1個	
$dX\gamma_1/dt=K_{gam} \{ \sum_{i=1}^{12} Q_{1i} - \sum_{i=1}^{12} J_{1i} \}$ $\gamma_1 = \gamma_{min} + (\gamma_{max} - \gamma_{min}) / \{ 1 + \exp(-X\gamma_1) \}$	
ガンマ2ニューロン 1個	
$dX\gamma_2/dt=K_{gam} \{ \sum_{i=1}^{12} Q_{2i} - \sum_{i=1}^{12} Q_{1i} - \sum_{i=1}^{12} J_{2i} \}$ $\gamma_2 = \gamma_{2min} + (\gamma_{2max} - \gamma_{2min}) / \{ 1 + \exp(-X\gamma_2) \}$	

表-4 計算初期状態

i	L_i	λ_i	G_i	P_{1i}	P_{2i}
1	178.0	5.3262	79.955	48.709	49.335
2	215.0	5.8874	116.955	48.709	49.335
3	254.0	6.7599	155.955	48.709	49.335
4	263.0	7.0022	164.955	48.709	49.335
5	238.0	6.3671	139.955	48.709	49.335
6	264.0	7.0301	165.955	48.709	49.335
7	340.0	9.7030	241.955	48.709	49.335
8	274.0	7.3192	175.955	48.709	49.335
9	250.0	6.6571	151.955	48.709	49.335
10	189.0	5.4659	90.955	48.709	49.335
11	145.0	5.0447	46.955	48.709	49.335
12	144.0	5.0394	45.955	48.709	49.335
				γ_1	γ_2
Ftotal 8780.66				12.1382	5.5619

計算初期値は表-4に示すように与えた。これらの値は次のように決定した。

- ① 水力は自流運転、すなわち流入量に等しい水量を各時間帯で使用すると仮定して水力出力 (P_{1i} , P_{2i}) を決定した。
- ② 火力は需給平衡条件を満たすように火力出力 (G_i) を決定した。
- ③ ラムダ $\{\lambda_i\}$ は火力増分燃料費 (dF_i/dG) に等しいとした。
- ④ ガンマ $\{\gamma_n\}$ は (ラムダ平均値) / (増分使用水量) から計算した。

これらの初期値はすべての制約条件を満足している。

計算条件は次のように選定した。

- ① 連立微分方程式の解法：ルング・クッタ・ギル法

刻み幅： $h=1/100$

- ② 収束判定基準

$\{\text{すべてのニューロン入力}\} \leq 1/1000$

- ③ ニューロン速度

ニューロン速度の理論的決定方法は不明であることから、幾通りもの試行を行い、次の値を選定した。

$$K_u=30$$

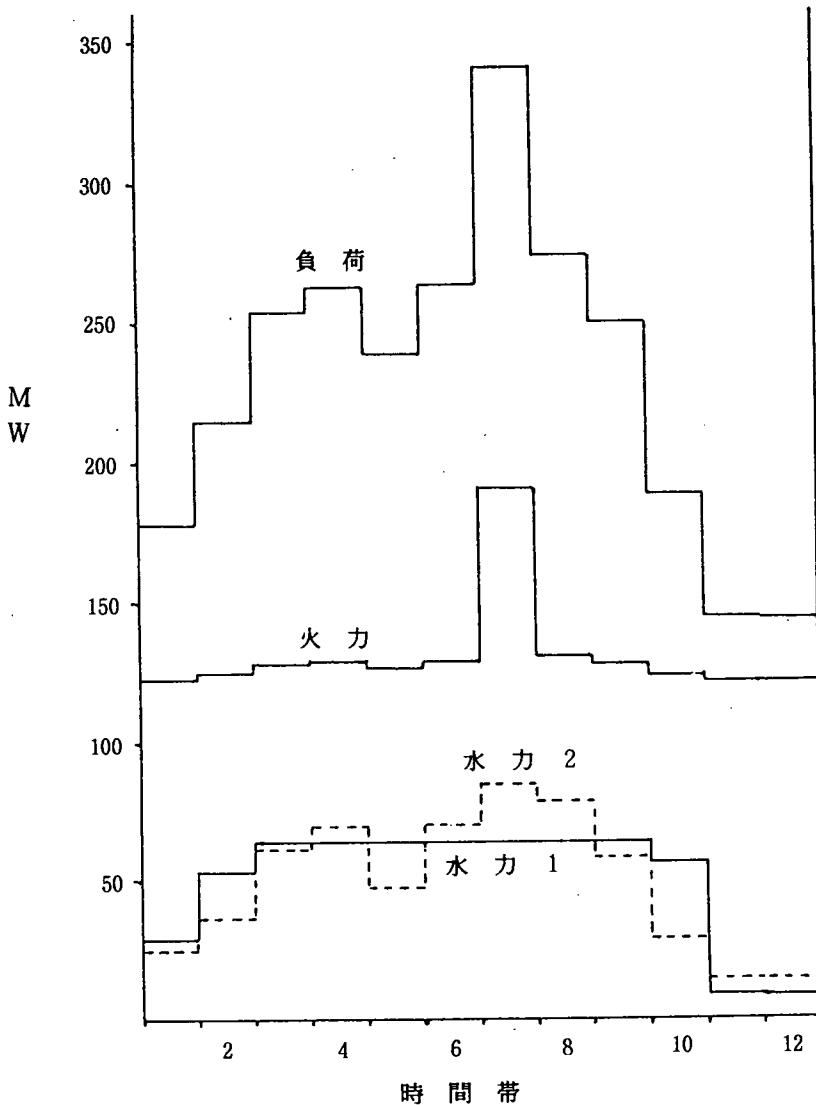
$$K_{i,am}=K_u/\text{発電機ユニット数}=10$$

$$K_{g,am}=K_{i,am}/\text{時間帯数}=0.8333$$

計算結果を図-2および表-5に示す。この表から需給平衡条件および使用水量平衡条件は指定値よりも小さい誤差に止まっていることが分かる。

表-5 計算結果の一例

i	L_i	λ_i	G_i	P_{1i}	P_{2i}	λ_i ニューロン入力
1	178.0	6.0116	123.394	29.576	25.029	+0.0000
2	215.0	6.0448	125.051	53.007	36.942	+0.0000
3	254.0	6.1135	128.401	64.000	61.600	-0.0000
4	263.0	6.1357	129.458	64.000	69.542	+0.0000
5	238.0	6.0742	126.498	64.000	47.502	-0.0000
6	264.0	6.1382	129.575	64.000	70.425	-0.0000
7	340.0	7.7899	191.000	64.000	85.000	+0.0000
8	274.0	6.1628	130.738	64.000	79.262	+0.0000
9	250.0	6.1037	127.928	64.000	58.072	-0.0000
10	189.0	6.0214	123.890	36.540	28.570	-0.0000
11	145.0	5.9820	121.896	8.693	14.412	+0.0000
12	144.0	5.9811	121.850	8.060	14.090	-0.0000
n γ_n γ_n ニューロン入力 $F_{total}=8448.35$						
1	11.3696	+0.0000	$K_u=30$ $K_{i,am}=10$ $K_{g,am}=0.83333$			
2	5.2286	+0.0000	収束ステップ数 5446			



図一 2 最適負荷分担状況

一方、火力および水力ニューロン入力为零にどの程度近づいているか、すなわち、最適化方程式がどの程度満足されているかを調べてみると表一 6 のようになっている。この表から出力制約に掛っていない時間帯では 10^{-6} 程度の誤差で、最適化方程式が十分に満足されていることが分かる。出力上限制約に掛っている場合には*印をつけてニューロンバイアス値を示しているが、このバイアスによって出力制約にかかる場合の最適化方程式が満足されている。

表-6 収束後のニューロンの入力値とバイアス値

i	XG'_{i_1}	$XP1'_{i_1}$	$XP2'_{i_1}$
1	$+9.536 \times 10^{-7}$	+0.0000	$+1.907 \times 10^{-6}$
2	+0.0000	-9.356×10^{-7}	$+9.536 \times 10^{-7}$
3	-9.636×10^{-7}	+0.0531*	$+4.768 \times 10^{-7}$
4	+0.0000	+0.0753*	$+9.536 \times 10^{-7}$
5	-4.768×10^{-7}	+0.0138*	$+4.768 \times 10^{-7}$
6	-9.536×10^{-7}	+0.0777*	$+9.536 \times 10^{-7}$
7	$+4.768 \times 10^{-7}$	+1.7295*	+1.6111*
8	$+9.536 \times 10^{-7}$	+0.1024*	$+1.907 \times 10^{-6}$
9	+0.0000	+0.0433*	$+1.430 \times 10^{-6}$
10	-9.536×10^{-7}	-9.536×10^{-7}	$+4.768 \times 10^{-7}$
11	$+9.536 \times 10^{-7}$	-4.768×10^{-7}	$+1.430 \times 10^{-6}$
12	-9.536×10^{-7}	-1.430×10^{-6}	$+4.786 \times 10^{-7}$
XG'_{i_1} : 火力ニューロン入力 $XP1'_{i_1}$: 水力ニューロン入力 $XP2'_{i_1}$: 水力2ニューロン入力 *印 : 出力制約に掛っていることを示し、ニューロンバイアス値を示す。			

計算に要したステップ数は5445であり、パソコンでは、数時間を必要とした。収束状況は図-3にその一部分を示したように250ステップ程度で、 γ_1 , γ_2 および全燃料費の変化が殆ど見られなくなり、 λ_{i_1} , γ_1 , γ_2 の各ニューロン入力値は1/10000程度にまで減少するが、ごく少数の時間帯の水力1ニューロンの動きが極めて遅く最適解を得るのに時間がかかる原因となっている。

このようにして得られた結果は、従来法である『ガンマ法』による結果とは3桁まで一致している。なお、計算に要した時間は「ガンマ法」の方が短く、提案法の約1/6であった。

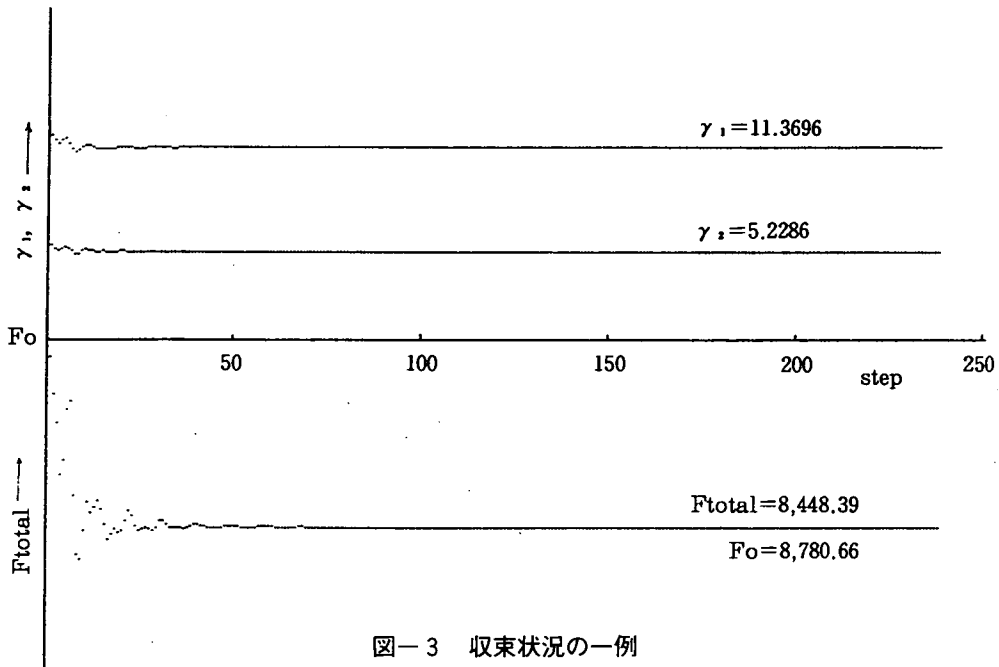


図-3 収束状況の一例

8. む す び

連接水系運用最適化問題にHNN技法を適用し、最適化方程式を十分に満足する最適解を求めることが出来ることを示した。本文では、(1)HNNのバイアスを導入し、その動作と物理的意味を示し、最適化方程式との関係を明らかにした。また、(2)最適化方程式を十分に満足するような解を求めるためにかなりのステップ数を必要とすることが示され、ニューロン速度の選定に更に検討を加えることが必要であることも明らかとなった。

今後の課題としては、種々の考えられるが、水力の貯水量による有効落差変動を考慮した場合の最適運用問題と揚水式水力の最適運用問題を予定している。

参考文献

- [1] 松田、縄本：ホップフィールドネットにおける数値表現と電力負荷配分への適用 平成元年電気学会全国大会
- [2] 植木、福山：ニューラルネットワークの動的ELDへの応用 平成2年電気学会全国大会 1044
- [3] CHIA-YIN-MAA 他：A Constrained Optimization Neural Net Technique for Economic Power Dispatch IEEE, ISCAS, 1990. pp. 2946
- [4] 都築：ホップフィールド型ニューラルネットによる火力ユニット群の最適負荷配分計算法 明治大学科学技術研究所紀要 Vol.30, No.2, PP.13~22, 1991
- [5] 都築、森：HNN技法による火力系統の最適運用計画計算法 平成4年度電気学会全国大会 1099
- [6] 都築、森：HNN技法による水火力系統の日間経済運用計画計算法 平成4年電気学会全国大会 1101
- [7] 藤田：アナログ電子計算機のプログラム [増補] 昭見堂 昭和53年 II-4